

안전도 제약 Benders 분해법을 적용한 예방모드 무효전력투입 최적화 방안

정중훈, 송화창, 이병준, 권세혁
고려대학교 전기·전자·전파 공학부

Corrective-mode based Security constrained Benders decomposition approach toward Preventive-mode Optimal Reactive Power Planning

Jonghoon Jeong, Hwachang Song, Byoungjun Lee, Sae-hyuk Kwon
School of Electrical Engineering, Korea University

Abstract - This paper presents a method for security constrained optimal reactive power planning in electric power systems. This method deals with corrective mode optimal reactive power dispatch in each (n-1)contingency system state and determination of the location and amount of reactive sources in preventive mode.

In this paper the proposed scheme uses Benders decomposition method to determine the proper amount and location of reactive support in order to maintain a proper voltage profile and minimize active power transmission losses.

This method is tested on IEEE 30 bus test system to prove effectiveness.

1. 서 론

일반적인 최적 무효전력계획은 건전상태 계통에서 모션전압과 무효전력 등 안전도 제약을 만족하며 유효전력손실 및 무효전력 투입량을 최소화하는 최적화 문제의 형태이다. 전력계통의 안전도는 송전선로의 (n-1) 상정사고의 안전도 제약을 최적조류계산에 추가함으로써 더욱 크게 향상되어진다. (n-1)상정사고의 영향을 고려한 확장된 최적무효전력 계획은 상정사고 후에 실시하는 제어여부에 따라 수정모드와 예방모드로 구분된다. [1,2]

수정모드에서는 건전계통과 상정사고 후에 무효전력원과 변압기 tap 등 무효전력제어변수를 주어진 계통운용제약조건범위 내에서 각 계통상태마다 재조정한다. 이를 통해 계통손실 또는 발전비용을 감소시키면서 적절한 계통운용을 위한 무효전력원의 투입량을 결정한다. 따라서, 무효전력투입량은 계통상태마다 모두 다르며 일반적으로 가장 심각한 상정사고에 대한 투입량이 전체의 투입량을 결정한다. 이는 전 계통상태를 고려할 경우 경제적 조화성(coordination)이 부족하다. 예방모드에서는 상정사고 후에 무효전력제어 변수들을 재조정하지 않는다. 따라서 상정사고 후에도 조류해가 계통운용제약을 만족하면서 실행가능한 계통상태로 남아있을 수 있는 건전상태의 무효전력투입량을 결정한다. 이로 인해 예방모드는 수정모드에 비해 제어변수들의 재조정을 고려하는 유연성이 부족하다.

일반적으로 종래의 연구에서는 어느 한 접근법에 초점을 두거나, 예방모드에서는 수정모드를 크게 고려하지 않았다. 최근 [3]에서는 Decoupled 조류계산에 기반한 두 접근법을 동시에 고려한 연구를 제시하였으나 계통운영의 측면에서 전압문제부분이 미흡하다.

본 논문에서는 AC조류계산에 기반하여 계획단계에서 수정모드와 예방모드를 동시에 고려한 (n-1)상정사고의 안전도 제약 무효전력투입 최적화 방안을 제시한다. 이를 통해 계획단계에서 한 계통의 건전상태 및 (n-1)상정사고 등 고려하는 계통상태에 대해 주어진 목적함수를 최적화하는 무효전력원의 최적위치 및 용량을 예방모드에서 산정하며, 제시된 무효전력투입 계획안을 바탕으로 각 계통상태에서의 최적의 운전점을 찾는 수정모드의 최적무효전력 배분을 동시에 고려한다.

무효전력투입계획에서의 목적함수는 경제성과 안전성 확보를 위해 계통손실 및 무효전력원의 투입비용을 포함하는 운전비용 최소화과 계통 운용자 측면의 계통 모션전압유지 등이 고려된다.

본 논문에서는 혼합정수계획법으로 표현되는 무효전력계획 문제를 Benders 분해법[4]을 적용하여 건전상태 및 (n-1) 상정사고 상태에서의 최적무효전력 배분을 결정하는 부문제와 각 계통상태에서의 목적함수의 합을 최소화하도록 무효전력원 투입위치 및 용량을 결정하는 주문제로 나누어 최적값을 산정하는 알고리즘을 제시한다. 그리고 본 알고리즘을 적용한 IEEE 30모션 시험계통에 대한 사례연구를 통해 그 유용성을 검증하였다.

2. 문제의 구성

nc개의 (n-1)선로 상정사고의 안전도제약을 가진 무효전력원의 최적위치 및 용량산정을 위한 문제는 다음과 같은 최적화 문제의 형태로 나타나게 된다.

2.1 목적함수

본 논문의 무효전력투입계획의 목적함수는 위에서 언급한 계통의 안전성 측면과 경제적 측면을 모두 고려하여 무효전력의 계통손실, 계통전압규정값과의 차이, 그리고 무효전력원의 투입용량을 nc 개의 상정사고에 대해 최소화 하는 다음 식 (1)로 표현된다.

$$\min f = \sum_{n=1}^{nc} f_{0n} + \sum_j QC_j \cdot r_j \quad (1)$$

$$f_{0n} = \alpha P_{loss,n} + \beta \sum_i (V_{n,i} - V_{i,spec})^2$$

식(1)에서 P_{loss} 는 계통손실에 해당한다.

α 는 목적함수를 최소화 하는 데 있어서 손실감소의 가중치를 나타내는 계수이며, β 는 전압편차의 가중치에 해당한다. 여기에서 n은 n-번째 계통상태를 나타내며, $V_{n,i}$ 는 i 모션의 전압크기를 나타낸다. QC_j 는 j번째 모션에 투입되는 무효전력원의 양을 나타내고 r_j 는 j번째 모션에서 무효전력원의 투입여부를 결정하는 정수이다.

2.2 제약조건

제약조건도 역시 nc개의 계통상태를 고려하기때문에 n-번째의 계통상태에 대한 제약조건 식(1-1~7)과 같은 set이 nc개가 존재하게 된다.

$$P_{n,Ti}(\delta, V_L, V_G, t) = P_{n,Ti} \quad (1-1)$$

$$Q_{n,Ti}(\delta, V_L, V_G, t) - QC_{n,i} = Q_{n,Ti} \quad (1-2)$$

$$V_{G,min} \leq V_{Gn} \leq V_{G,max} \quad (1-3)$$

$$t_{min} \leq t_n \leq t_{max} \quad (1-4)$$

$$V_{L,min} \leq V_{Ln} \leq V_{L,max} \quad (1-5)$$

$$Q_{G,min} \leq Q_{Gn}(\delta, V_L, V_G, t) \leq Q_{G,max} \quad (1-6)$$

$$QC_{min} \leq QC_n \leq QC_{max} + \Delta QC^T \cdot r \quad (1-7)$$

(n=1, ..., nc)

식(1-1,2)는 각 계통상태의 교류조류방정식에 해당하는 등호제약이며, 식(1-3~7)은 부등호 제약조건으로 제어변수의 제약으로는 발전기 모션전압 V_{Gn} , 변압기 탭 t_n , 그리고 투입무효전력원의 무효전력 $Q_{Cn,1}$ 와 피제어변수의 상하한 제약으로는 부하모션전압 V_{Ln} , 발전기 무효전력 Q_{Gn} 가 있다. r 은 무효전력원의 투입여부를 결정하는 정수를 나타낸다.

3. 문제의 분해

앞에서 구성한 문제의 목적함수 및 제약조건은 비선형 성을 가지고 있고 투입여부를 나타내는 정수를 결정하는 변수가 포함되어 있는 비선형혼합정수계획법(MINLP) 문제이다. 또한 상정사고를 고려한 무효전력원의 최적화 문제이기 때문에 문제는 더욱 복잡해지게 된다.

여기에서는 Benders 분해법을 적용하여 예방모드 주문제에서는 nc 개의 각 상정사고에 대한 수정모드 부문제로부터 얻은 정보를 바탕으로 무효전력원의 투입량과 투입위치를 결정하며, 수정모드 부문제는 상정사고를 고려하기 때문에 주문제에서 제시된 투입안을 가지고 각 상정사고상태마다 손실 및 전압편차를 최소화한다.

3.1 수정모드 부문제

수정모드 부문제는 예방모드 주문제에서 제시된 무효전력원의 투입위치 및 투입량에 대해 각 계통상태에 대한 최적 운전점을 찾는 수정모드이다. 따라서, 고려하는 계통상태들의 수만큼의 부문제가 존재한다.

m 번째 Benders iteration 에서의, 각 상정사고에 대한 운영부문제들중 n 번째 계통상태에 대한 부문제는 다음과 같다.

$$\min f1_{,n}^m = f0_n^m + \sum_j QC_j^* \cdot r_j^* \quad (2)$$

s. t.

$$P_{n, Ti}(\delta, V_L, V_G, t) = P_{n, Ti} \quad (2-1)$$

$$Q_{n, Ti}(\delta, V_L, V_G, t) - Q_{Cn, i} = Q_{n, Ti} \quad (2-2)$$

$$V_{G, \min} \leq V_{Gn} \leq V_{G, \max} \quad (2-3)$$

$$t_{\min} \leq t_n \leq t_{\max} \quad (2-4)$$

$$V_{L, \min} \leq V_{Ln} \leq V_{L, \max} \quad (2-5)$$

$$Q_{G, \min} \leq Q_{Gn}(\delta, V_L, V_G, t) \leq Q_{G, \max} \quad (2-6)$$

$$QC_{\min} \leq QC_n \leq QC_{\max} + \Delta QC^* \cdot T \cdot r^* \quad \lambda_n \quad (2-7)$$

$$(QC_j^* \cdot r_j^* = QC_{j, \max} + \Delta QC_j^* \cdot r_j^*)$$

잘 알려져 있듯이 각 부문제에 적용된 Benders 분해법의 기본적인 적용은 다루기 어려운 변수를 고정시키면 문제가 쉬운 문제로 바뀌는 점을 이용하고 있다. 여기서는 식(1)의 목적함수와 식(1-7)의 제약조건의 정수벡터 r 과 QC 가 이에 해당하며 이들을 임의의 값 r^* , QC^* 로 고정시키어 식(2-1~7)과 같이 표현한다. λ_n 은 QC 상한제약에 대응하는 쌍대변수(dual variable)이다.

위 부문제는 비선형문제이다. 본 논문에서는 이 문제를 풀기 위해 실해가능영역에서 안정적인 수렴성을 갖는 연속선형계획법(SLP)을 이용하였다.

3.2 예방모드 주문제

nc 개의 각 수정모드 부문제로부터 얻은 정보를 바탕으로 구성되어 무효전력원의 투입용량 및 위치를 결정하는 예방모드이다.

쌍대변수 λ 는 각 부문제의 최적해에서 QC 의 부등호제약이 단위량 변화하였을 때 부문제의 목적함수의 변화율을 나타내며, 주문제에 중요한 정보를 제공한다. Benders 반복 m 번째 부문제 계산 후, m 번째까지의 쌍대변수 및 각 부문제의 목적함수들을 가지고 구성되는 $m+1$ 번째의 무효전력원의 투입결정의 주문제는 다음과 같이 구성된다.

식(3)의 목적함수 $f2$ 에서 $f0_n^{m+1}$ ($n=1, \dots, nc$)은 $m+1$ 번째 투입 후 예상되는 부문제의 목적함수 값이다. 이 문제에서 혼합정수계획법(MILP)을 통해 결정되는 변수는 ΔQC_i^{m+1} 과 r_i^{m+1} 이다.

$$\min f2 = \sum_{n=1}^{nc} f0_n^{m+1} + \sum_i \Delta QC_i^{m+1} \cdot r_i^{m+1} \quad (3)$$

s. t.

$$f0_1^{m+1} \geq f0_1^j + \sum_i \lambda_{1,i}^j (\Delta QC_i^{m+1} - \Delta QC_i^j) \quad (3-1)$$

⋮

$$f0_n^{m+1} \geq f0_n^j + \sum_i \lambda_{n,i}^j (\Delta QC_i^{m+1} - \Delta QC_i^j)$$

⋮

$$f0_{nc}^{m+1} \geq f0_{nc}^j + \sum_i \lambda_{nc,i}^j (\Delta QC_i^{m+1} - \Delta QC_i^j)$$

$r_i = 0$ 또는 1

$n = 1, \dots, nc$: 각 계통상태(Base case 및 각 상정사고)를 나타내는 인덱스

$j = 0, 1, \dots, m$: Benders iteration

Benders cuts이라 불리는 식(3-1)의 제약조건은 m 번째까지의 쌍대변수 $\lambda_{n,i}^j$ ($n=1, \dots, nc$: $j=1, \dots, m$: i =투입모션번호) 및 각 부문제의 목적함수값 $f0_n^j$ ($n=1, \dots, nc$: $j=1, \dots, m$) 들로 구성되며, $m+1$ 번째에서는 $(nc \times m)$ 개의 제약조건이 형성된다.

각 Benders iteration 후에는 주문제로부터는 목적함수 $f2$ 값을, 부문제로부터는 각 상정계통상태의 부문제 목적함수들 중 손실 및 전압편차의 최소 최적값들의 합 $f3$ 을 구할 수 있다. $f2$ 와 $f3$ 의 차이가 어느 수렴허용범위 내에 들어오면 최적해에 도달했다고 판단한다.

4. 사례연구

앞 절에서 제시한 알고리즘을 IEEE 30모션 시험계통에 적용해 보았다. 무효전력계획 연구에 자주 이용되고 있는 IEEE 30모션 계통은 6개의 발전기 모션, 18개의 부하모션, 그리고 6개의 중간모션을 가지고 있고, 41개의 선로 및 4개의 변압기가 있는 계통이다. 본 사례연구에서 식(1) 목적함수의 규정 전압 $V_{i, spec}$ 은 1.0(p.u)로 정하였고 유효부하가 존재하는 부하모션 전압편차만을 고려하였으며, 계통손실에 대한 가중치 α 와 전압편차에 대한 가중치 β 는 모두 1.0으로 하였다. 각 발전기 모션의 전압제약은 1%(0.990~1.001(p.u)), 부하모션 전압제약은 5%(0.950~1.050(p.u)) 그리고, 변압기 탭 상하한 제약은 0.910~1.100(p.u)으로 하였다. 그리고 모든 부하모션이 무효전력원의 투입후보지로 선택되었다고 가정하였으며 초기 무효전력원의 투입량은 0[MVAR]다. 본 상정사고의 안전도 제약 무효전력투입계획의 사례연구에서는 임의로 선정된 건전상태 및 14개 선로의 상정사고를 한번에 고려하는 최적화 계산을 수행하였다. 즉, 전 계통에 대한 무효전력원의 투입계획을 위한 위치 및 용량을 산정하고, 이 투입계획안에 따라 각 상정사고에서의 최적 무효전력 투입점을 계산하였다.

표.1 예방모드에서의 무효전력원의 투입 위치와 용량

모션번호	투입용량	모션번호	투입용량
8	7[MVAR]	20	7[MVAR]
9	7[MVAR]	22	7[MVAR]
11	7[MVAR]	23	6[MVAR]
12	7[MVAR]	24	7[MVAR]
13	7[MVAR]	25	7[MVAR]
14	7[MVAR]	26	7[MVAR]
15	7[MVAR]	27	5[MVAR]
19	7[MVAR]	29	6[MVAR]

표.1에서는 예방모드에서 제시하는 무효전력투입계획안 즉, 무효전력원의 투입 위치 및 용량을 나타내고 있다. 총 16개 모선에 108[MW]의 설비가 투입되었다. 그림 1과 2는 표 1의 무효전력 투입계획안을 바탕으로 각 상정사고마다 수정모드에서 최적무효전력 운전점을 정한 후의 계통손실과 전압편차의 합의 변화를 나타낸다.

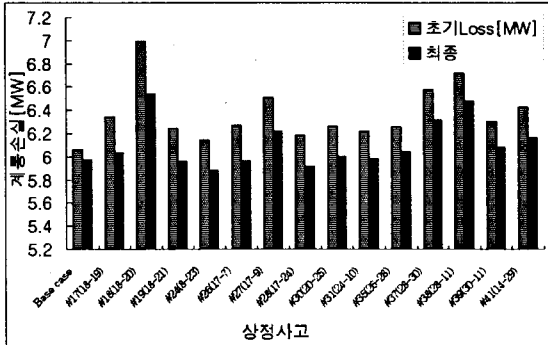


그림.1 계통손실의 변화

그림 1에서 계통손실이 초기보다 감소함을 알 수 있다. 그림2에서 규정된 전압에 대한 부하모선전압의 편차의 총합이 크게 감소함을 나타낸다. 즉, 계통의 전압 분포가 크게 개선됨을 확인할 수 있다.

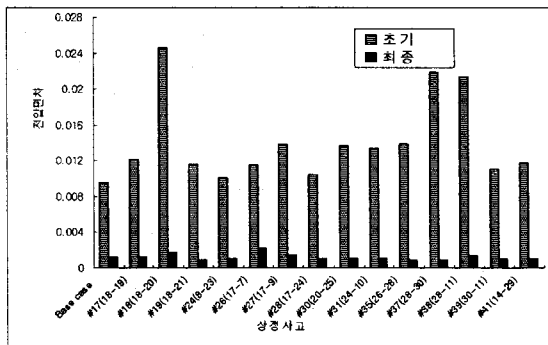


그림 2. 계통 전압편차 총합의 변화

다음 표.2와 표.3은 가장 손실이 큰 #18번 선로에 대해 본 논문에서 제시한 알고리즘과 수정모드만을 고려한 무효전력계획에 의한 최적운전점의 비교를 나타낸다.

표.2와 3을 같이 살펴보면, 예방모드와 수정모드를 동시에 고려할 때가 수정모드만을 고려할 경우보다 5개소 많은 위치에 투입되지만 실제 투입되는 총량은 더 작다. 한편 계통손실은 본 논문에서 제시하고 있는 수정모드와 예방모드를 동시에 고려하는 경우가 수정모드만을 고려하는 경우보다 더 작았다. 이는 무효전력 투입량이 계통전체에 고루 분포되었기 때문이다. 그리고 규정된 전압에 대한 부하모선전압의 편차의 총합은 수정모드만을 고려한 경우가 좀 더 작으나 두 경우 모두 초기 상태보다 매우 작아져, 전압분포가 크게 개선된다. 전압분포개선은 투입되는 무효전력의 분포와 투입량에 좌우됨을 알 수 있다.

표. 2. 수정모드와 예방모드의 비교

	수정모드만 고려	예방모드 및 수정모드 고려	초기상태
투입모선 수	11개	16개	0
계통손실 [MVAR]	6.6775	6.538	6.98796
전압편차[pu]	0.00150	0.00168	0.02459

표 3. 무효전력운전점의 비교

모선번호	수정모드	동시에 고려하는 경우
8	2.3[MVAR]	2.3[MVAR]
9		1.2[MVAR]
10	2.72[MVAR]	
11	15.4[MVAR]	2.2[MVAR]
12	17[MVAR]	5.1[MVAR]
13	1[MVAR]	7[MVAR]
14	5[MVAR]	3.4[MVAR]
15		5.1[MVAR]
19		3.3[MVAR]
20	4.69[MVAR]	4.9[MVAR]
22	3.2[MVAR]	1.2[MVAR]
23		0.9[MVAR]
24		1.2[MVAR]
25	2[MVAR]	1.2[MVAR]
26		2[MVAR]
27	4.16[MVAR]	3.8[MVAR]
29	19.1[MVAR]	1.9[MVAR]
총 투입량	75.28[MVAR]	46.7[MVAR]

5. 결 론

본 논문에서는 AC조류계산에 기반하여 (n-1)상정사고의 안전도제약을 고려한 무효전력 투입최적화 방안을 제시하였다. Benders 분해법을 적용한 이 무효전력투입 방안은 예방 및 수정모드를 모두 고려한다. 즉, 계획단계에서 (n-1) 상정사고의 영향을 고려한 무효전력원의 최적 투입 위치 및 용량을 예방모드에 산정하고 주어진 투입계획안을 가지고 각 계통상태의 최적운전점을 구하였다. 또한 경제성과 안전성 확보를 위하여 계통손실과 전압편차의 합을 최소화하는 목적함수를 고려하였다. 그리고 계통의 손실 감소 및 전압분포개선이 이루어짐을 확인했다.

향후 단일 부하수준의 상정사고 뿐만 아니라 여러 부하수준을 고려할 수 있으며 상정사고해석 알고리즘의 추가에 대한 보강 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.Granville, M.V.F.Pereira, A.Monticelli, "Application of decomposition techniques to VAR planning: methodological and computation aspects", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 9, No. 4, pp.1780-1787, November 1994
- [2] T. Gomez, I. J. Perez-Arriaga, J. Lumbreras, V. M. Parra, "A security-constrained decomposition approach to optimal reactive power planning", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991, pp.1069-1076
- [3] S.Ahmed, G.Strbac, L.Yao, A.dixon, A.Chebbu, A.Ekwue, D.T.Y.Cheng, "Method for green field security-constrained allocation of reactive support", IEE Proc.- Gener. Transm. Distrib., Vol. 146, No. 1, January 1999
- [4] A. M. Geoffrion, "Generalized Benders Decomposition", Journal of Optimization Theory and Appliation, Vol. 10, No. 4, 1972
- [5] B. Cova, N. Losignore, P. Marannino, M. Montagna, "Contingency constrained optimal power procedures for voltage control in planning and operation", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 602-608
- [6] Hwachang Song, Byoungjun Lee, "Optimal Allocation of Flexible Ac Transmission System Devices For Loss Minimization in Power System", ICEE'99 Proceedings, Vol. 2, pp.26-29, 1999